

# МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

УДК 621.771.252

Сычков А.Б., Савченко С.А., Тулупов О.Н., Моллер А.Б.

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ НА ЛИНИИ «СТЕЛМОР» В ПОДШИПНИКОВОМ БУНТОВОМ ПРОКАТЕ ИЗ СТАЛИ ШХ15

**Аннотация.** Актуальность работы заключена в высокой научной и практической значимости разработки технологии производства подшипниковой марки стали ШХ15, улучшения ее структурообразования на современном мелкосортно-проволочном стане 370/150 из непрерывнолитой заготовки (НЛЗ) сечением 250×300 мм, имеющего высокую скорость прокатки – 100 м/с и более, проволочный 10-клетьевого и редуционно-калибровочный 4-клетьевого блоки, оказывающие значимое влияние на структурообразование проката. Целью данной работы является исследование и формирование однородной микроструктуры и свойств бунтового проката путем разработки режимов предварительной термической обработки (ПТО – гомогенизирующего отжига (ГО) литой структуры НЛЗ) и окончательной ТО (ОТО) – сорбитизация пластинчатого перлита и его сфероидизация – СО), обеспечивающих максимальную технологичность переработки бунтового проката у потребителей. Исследования качественных характеристик осуществлялись по следующим показателям: макро-структура (НЛЗ) сечением 250×300 мм на макротемплетах, микроструктура и механические свойства бунтового проката диаметром 5,5–18,5 мм – в соответствии с методическими стандартами. Впервые установлено, что уровень карбидной сегрегации достигается путем значительной степени вытяжки и частичной гомогенизации макро-структуры НЛЗ и раскатов при обработке в линии стана 370/150. НЛЗ для производства бунтового проката диаметром более 8,5 мм необходимо подвергать предварительной ТО – ГО (температура 1200°C в течение не менее 6 ч). Разработаны и внедрены эффективное двухстадийное охлаждение бунтового проката из стали ШХ15 на линии «Стелмор» (температура виткообразования – 860–870°C, скорость воздушного охлаждения – 18-20°C/с) с получением сорбитообразного перлита в количестве не менее 95% с межпластинчатым расстоянием 0,07-0,14 мкм, толщиной пластин цементита не более 0,08 мкм и незначительных (менее 5%) участков тонкопластинчатого и среднеластинчатого перлита, без подкалки. Результаты исследований позволили достичь поставленную в настоящей статье цель.

**Ключевые слова:** микроструктура, линии двухстадийного охлаждения «Стелмор», бунтовой прокат, сталь подшипникового назначения, непрерывнолитая заготовка, комплекс качественных показателей, сорбит, зернистый перлит, световой микроскоп, энергодисперсионный микроанализатор

### Введение

Высокие требования, предъявляемые к исходному материалу при производстве роликовых и шариковых подшипников, привели к дальнейшему развитию и совершенствованию качества металла на всех этапах производства. В условиях Белорусского металлургического завода (БМЗ), начиная с получения непрерывнолитой заготовки (НЛЗ) крупного сечения – 250×300 мм и заканчивая бунтовым прокатом, произведенным на современном проволочном стане 370/150 со сложным напряженно-деформационным состоянием (НДС) – высокая скорость деформации, определяемая линейной скоростью рабочих валков – 100 м/с и более, кратность прокатки – до 37 рабочих катающих клетей, суммарный коэффициент вытяжки равен 3074, соответствующих требованиям мировых стандартов и конечных заказчиков-потребителей [1].

Особенностью современных рынков является использование бунтового проката как исходного сырья для производства роликов и шариков методом холодной объёмной штамповки (ХОШ) для подшипников малых и средних размеров, что, в свою очередь, накладывает дополнительные требования к качеству

бунтового проката [2]. Важными характеристиками работы подшипниковой стали являются высокие значения износостойкости и прочности, сопротивления усталости при малой хрупкости, упругости – эластичности. Все перечисленные характеристики обеспечиваются получением однородного по сечению химического состава и микроструктуры металла. Присутствие в стали неметаллических включений, карбидной сегрегации, разнотерности и других негативных структурных и качественных показателей приводят к возникновению и росту концентрации микронапряжений в процессе эксплуатации подшипника и его преждевременному разрушению (выкрашиванию, растрескиванию и др.) [3].

В производстве подшипников широкого назначения на постсоветском пространстве основную долю сортамента по-прежнему занимает сталь типа ШХ15, имеющая существенный недостаток – структурную неоднородность, вызванную заэвтектоидным химическим составом – высоким содержанием углерода (0,95–1,05%) и хрома (1,30–1,65%). Это приводит, в свою очередь, к развитию ликвационных процессов и образованию карбидной неоднородности.

Высокие требования к качественным характеристикам металлопроката определены особыми требованиями, предъявляемыми к подшипникам, что поз-

воляет увеличить срок службы узлов, машин, агрегатов и др. [4]. Кроме того, тенденцию к повышению качества металлопродукции, в частности металла для изготовления деталей подшипников, обуславливает и растущая конкуренция на международном рынке [5].

Традиционные подходы, обеспечивающие получение требуемого комплекса свойств, основаны на выборе химического состава стали, технологических параметров выплавки, внепечной обработки, разливки, прокатки и ТО НЛЗ и бунтового проката. Ранее проведенные исследования по определению влияния материалов и технологических параметров на сталеплавильном и прокатном переделах по обеспечению качественных характеристик НЛЗ и бунтового проката из стали ШХ15 недостаточны для полноценного анализа и формулирования выводов в условиях БМЗ. Это связано с узкой металлургической направленностью, особенностями оборудования и условиями производства [1].

Необходимо было также оценить целесообразность применения предварительной ТО НЛЗ – гомогенизирующего (диффузионного) отжига для исключения микрофизической дендритной ликвации и получения однородной по химическому составу, структуре и свойствам заготовки и проката из нее.

Разработка технологии поточной ТО, обеспечивающей формирование эффективных микроструктур горячекатаного проката на линии «Стелмор» и после сфероидизирующего отжига (СО), основана на изучении опыта производства на специализированных предприятиях, за счет научно обоснованного выбора:

- режимов ГО НЛЗ;
- эффективной технологии двухстадийного охлаждения бунтового проката из марки стали ШХ15 на линии «Стелмор», обуславливающей образование тонкодисперсного сорбитообразного перлита;
- температурно-временных режимов последующей ТО для сфероидизации пластинчатого перлита бунтового проката.

Актуальность работы обусловлена высокой научной и практической значимостью в разработке

технологии производства подшипниковой марки стали ШХ15 путем новых теоретических и экспериментальных исследований процессов структурообразования (минимизация карбидной неоднородности, получение однородного мелкодисперсного и зернистого перлита) на современном мелкосортно-проволочном стане 370/150 из НЛЗ крупного сечения 250×300 мм, имеющего особенности оборудования и технологического процесса (высокая скорость прокатки порядка 100 м/с и более, наличие проволочного 10-клетьевого и редуционно-калибровочного 4-клетьевого блоков, оказывающих значимое влияние на структурообразование проката и т.п.).

Целью работы является исследование и формирование качественной однородной микроструктуры и свойств бунтового проката за счет разработки эффективных режимов ПТО (ГО литой структуры) и ОТО (сорбитизация пластинчатого перлита и его сфероидизация), обеспечивающих максимальный уровень технологичности переработки такого бунтового проката у потребителей (подшипниковых заводов). Достижение поставленной цели является формированием макро- и микроструктур путем разработки технологии ПТО и ОТО стали типа ШХ15 в условиях установленного технологического оборудования – ДСП-3, УПК, НРС, 4-ручьева МНЛЗ, стан 370/150 БМЗ из НЛЗ большого сечения 250×300 мм [6].

Двухстадийное охлаждение на линии «Стелмор» стана 370/150 (рис. 1) осуществляется на первой стадии водой в секциях №1-3 после 10-клетьевого блока BGV и в секциях №4, 5 после 4-клетьевого чистового блока до температуры нормализующей прокатки и/или ниже в зоне виткообразователя. На второй стадии происходит охлаждение воздухом на линии «Стелмор» после формирования витков на виткообразователе. По роликовому транспортеру витки бунтового проката (катанки) движутся с возможностью регулирования скорости, подачи воздуха до 20 вентиляторов при открытых или закрытых термоизолирующих крышках.

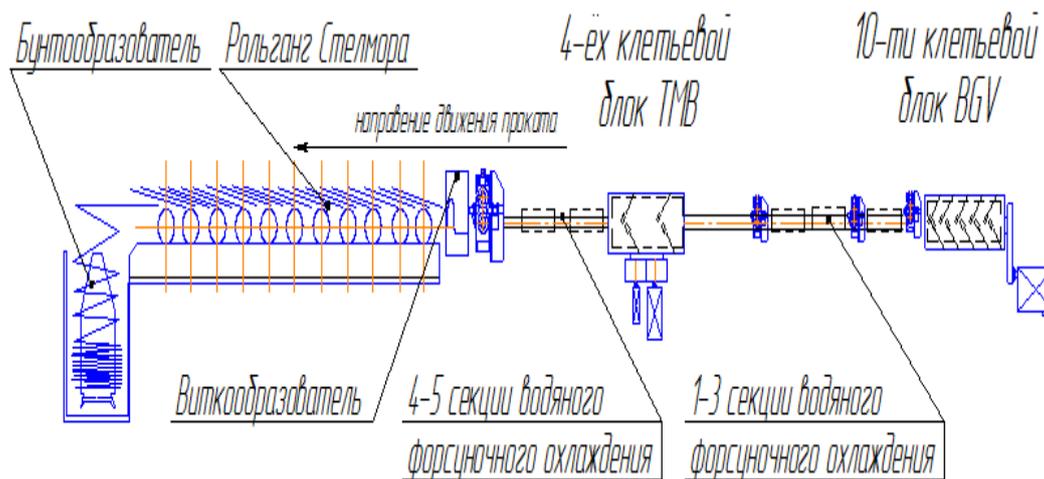


Рис. 1. Схема поточного охлаждения на линии «Стелмор» стана 370/150

### Материалы и методы исследования

Материалом исследования является бунтовой прокат диаметром 5,5–18,5 мм из подшипниковой марки стали ШХ15. Химический состав стали приведен в табл. 1.

Исследование качественных характеристик опытных плавок осуществлялось по следующим показателям: макроструктура (НЛЗ) сечением 250×300 мм на макротемплетах, микроструктура и физико-механическим испытаниям бунтового проката диаметром от 5,5 до 18,5 мм в соответствии с методическими стандартами:

– макроструктура НЛЗ – ГОСТ Р 58228, ОСТ 14-1-235; оценка дисперсности перлита – ГОСТ 8233; определение величины действительного зерна – ГОСТ 5639; измерение твердости по Бринеллю – ГОСТ 9012; требования к микроструктуре – ГОСТ 801; оценка величины обезуглероживания – ГОСТ 1763; ISO 3887; оценка качества поверхности – ГОСТ 21014; определение неметаллических включений – ГОСТ 1778 (метод Ш4); механические испытания на растяжение – ГОСТ 1497.

Микроструктурное исследование проводили при помощи:

– инвертированного металлографического микроскопа отраженного света «OLYMPUS GX-51» с цифровой приставкой (Япония);

– автоматической системы исследования микроструктуры и оценки загрязненности стали неметаллическими включениями (НВ) Thixomet;

– электронного микроскопа TESKAN VEGA GMS (Чехия) с энергодисперсионным микроанализатором для определения химического состава и размеров НВ с возможностью построения треугольника Pirelli.

Определение химического состава образцов осуществлялось на оптико-эмиссионном спектрометре ARL 4460 (Thermo SCIENTIFIC, Swizerland) в соответствии с ГОСТ 18895-97 «Сталь. Метод фотоэлектрического спектрального анализа». Уточнение содержания углерода и серы с помощью анализатора CS-200 (LECO Corporation, USA) в соответствии с ГОСТ 22536.1-88 «Сталь углеродистая и чугун нелегированный. Методы определения общего углерода и графита» и ГОСТ 12345-2001 «Стали легированные и высоколегированные. Методы определения серы». Содержание азота и кислорода определяли с помощью анализатора TC-400 (LECO Corporation, USA) в соответствии с ГОСТ 17745-90 «Стали и сплавы. Методы определения газов».

Микроструктурное исследование карбидной сегрегации проводили согласно ГОСТ 801 в соответствии со шкалами.

Микроструктура: ГОСТ 801 шкала 8 должна состоять из равномерно распределенного мелкозернистого перлита при увеличении ×500.

Карбидная ликвация: ГОСТ 801 шкала 6 увеличение ×100.

Карбидная сетка: ГОСТ 801 шкала 4 при увеличении ×500, ×1000.

В ГОСТ 801 в большинстве случаев приведены схематические изображения оцениваемых параметров.

Определение числа твердости на твердомеде НТУ 250В проводили в соответствии с ГОСТ 9012 «Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю», испытания бунтового проката на растяжение в соответствии с ГОСТ 1497 и ISO 6892 на разрывной машине Zwick/Roell Z250.

### Результаты и их обсуждение

В соответствии с поставленной целью исследований проведена разработка технологии формирования качественной однородной микроструктуры и свойств бунтового проката за счет установления эффективных режимов ПТО (ГО литой структуры) и ОТО (сорбитизация пластинчатого перлита и его сфероидизация), обеспечивающих максимальный уровень технологичности переработки такого бунтового проката у потребителей (подшипниковых заводов).

1. Гомогенизирующий отжиг непрерывнолитой заготовки [7, 8].

Определено влияние предварительной термической обработки (ГО – выдержка при температуре 1200°С в течение не менее 6 ч) НЛЗ на качественные показатели и степень карбидной неоднородности бунтового проката из подшипниковой стали ШХ15. Выполнены исследования и проанализированы результаты качественных показателей образцов катанки из стали ШХ15.

Без применения ГО значения карбидной ликвации и карбидной сетки соответствовали требованиям потребителей при оценке структур в соответствии с ГОСТ 801 установлено, что карбидная ликвация соответствовала требованиям на профилях 5,5; 6,5 и 11,5 мм, на других профилях превышала допустимые значения (2-3-й балл), требования по показателям структурная полосчатость и карбидная сетка неудовлетворительные на профилях 12,5 и 10,5 мм соответственно (рис. 2, 3).

С применением ГО по результатам исследований установлено, что уровень карбидной ликвации по всем профилям соответствовал требованиям согласно ГОСТ 801 (0,5-1 баллов) при норме – не более 2 баллов. Структурная полосчатость по ГОСТ 801 1-2 балла при норме не более 2 баллов (рис. 4, 5).

Таблица 1

Химический состав марки стали ШХ15

Массовая доля элементов согласно ГОСТ 801, %											
Марка стали	C	Mn	Si	Cr	P	S	Ni	Cu	Ni+Cu	Ti	O <sub>2</sub>
					не более						
ШХ15	0,95-1,05	0,20-0,40	0,17-0,37	1,30-1,65	0,027	0,020	0,30	0,25	0,50	0,010	15 ppm

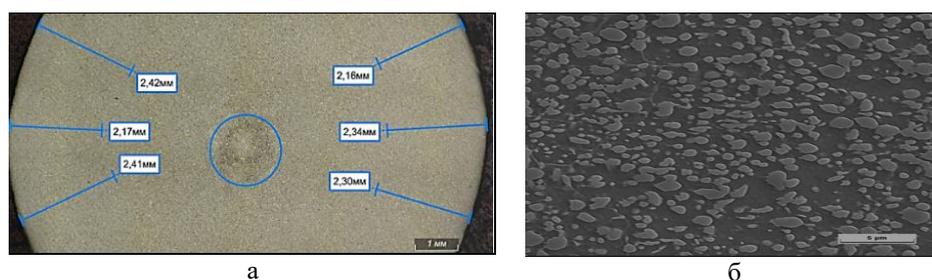


Рис. 2. Макроструктура бунтового проката диаметром 5,5 мм из стали ШХ15 из НЛЗ без ГО, травление в 4 %-м растворе азотной кислоты,  $\times 50$  (а), зернистый перлит после СО из НЛЗ без ГО,  $\times 10000$  (б)

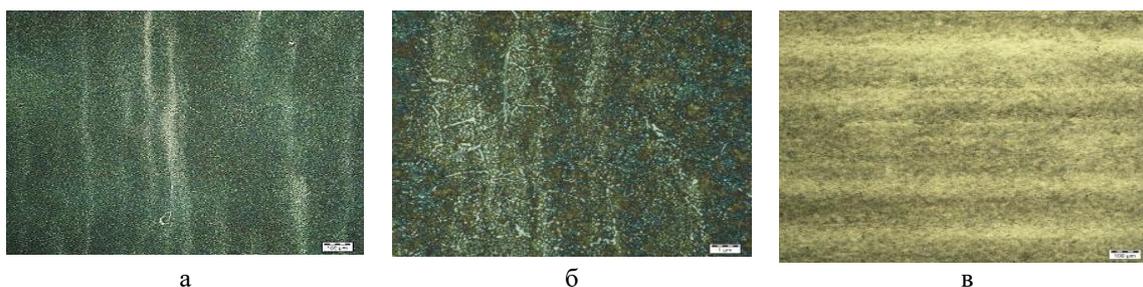


Рис. 3. Карбидная неоднородность бунтового проката без применения ГО НЛЗ, травление в 4 %-м растворе азотной кислоты: а – ликвация,  $\times 100$ ; б – сетка,  $\times 1000$ ; в – структурная полосчатость,  $\times 100$

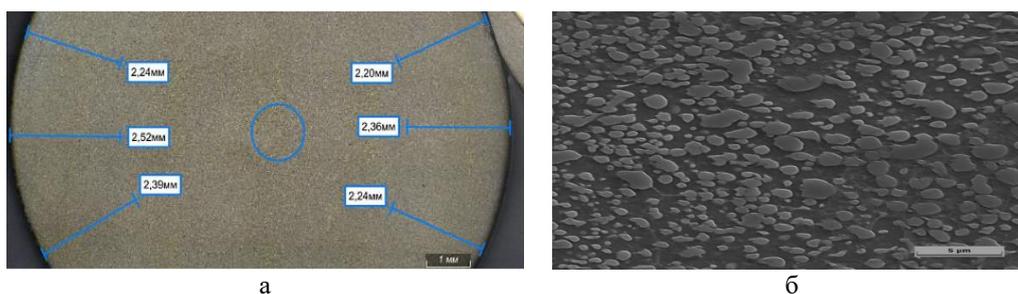


Рис. 4. Макроструктура бунтового проката диаметром 5,5 мм из стали ШХ15 из НЛЗ с ГО, травление в 4 %-м растворе азотной кислоты,  $\times 50$  (а), зернистый перлит после СО из НЛЗ с ГО,  $\times 10000$  (б)

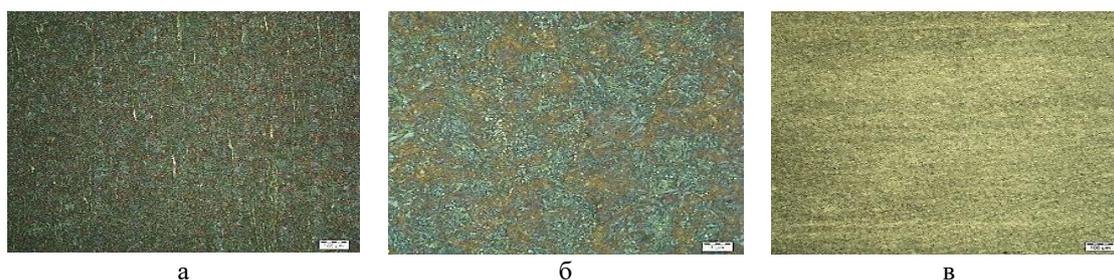


Рис. 5. Карбидная неоднородность бунтового проката с применением ГО НЛЗ, травление в 4 %-м растворе азотной кислоты: а – ликвация,  $\times 100$ ; б – сетка,  $\times 1000$ ; в – структурная полосчатость,  $\times 100$

Установлено, что получение требуемой микроструктуры проката обеспечивается на профилях диаметрами 5,5; 6,5 и 8,5 мм за счет значительной суммарной вытяжки при горячей деформации. Это обу-

словливает на профилях бунтового проката малых диаметров (не более 8,5 мм или суммарным обжатием не менее 1286,4) энергоэкономную технологию производства. Качество бунтового проката диаметрами от

9,5 до 18,5 мм достигается за счет проведения ГО НЛЗ, при котором минимизируется химическая неоднородность за счет диффузионных процессов.

Наилучшей исходной микроструктурой под сфероидизирующий отжиг при прокатке катанки из ШХ-сталей на проволочных станах является мелкодисперсный пластинчатый перлит. Получение равномерной мартенситной и бейнитной структуры затруднительно, а катанка в бунтах с закалочной структурой металла склонна к изломам. Сфероидизация грубопластинчатого перлита не позволяет получить полностью мелкозернистую перлитную структуру, поскольку Сг и Мп, распределяясь в цементите, замедляют процесс сфероидизации из-за большого межпластинчатого расстояния.

Результаты исследований макро- и микроструктуры, твердости согласно ГОСТ 801 и дополнительно механических свойств (относительного удлинения, предела текучести, временного сопротивления разрыву) бунтового проката диаметром 5,5; 11,5 и 18,5 мм из стали ШХ15 показали:

- структура бунтового проката с ГО НЛЗ после прокатки имеет гарантированное отсутствие осевой ликвации;

- размер аустенитного зерна бунтового проката соответствует номеру 8 без ГО и номеру 7 с ГО;

- мелкодисперсный сорбитообразный перлит получен при использовании разработанного управляемого поточного двухстадийного охлаждения как без ГО, так и с ГО металла;

- твердость бунтового проката без ГО и с ГО НЛЗ соответствует требованиям ГОСТ 801;

- с увеличением размера сечений катанки относительное удлинение, предел текучести, временное сопротивление разрыву из НЛЗ с ГО уменьшаются, так как в металле, испытывающем полиморфное превращение при гомогенизации в области высокотемпературной фазы, возможен рост зерна.

Однородная структура катанки после ГО НЛЗ позволила гарантированно получить микроструктуру с полной глобулизацией пластинчатого перлита после сфероидизирующего отжига в бунтовом прокате и значительное улучшение механических свойств заготовки для изготовления деталей подшипников.

2. Сорбитизация структуры пластинчатого перлита при двухстадийном охлаждении на линии «Стелмор» [9-12].

Изучен и проанализирован процесс водяного форсуночного и воздушного охлаждения бунтового проката из стали ШХ15 при проведении двухстадийной поточной термообработки в условиях стана 370/150, заключающийся в том, что раскат на первой стадии охлаждают с помощью воды до температуры  $t_k = 870 \pm 20^\circ\text{C}$  и на второй стадии воздушным охлаждением с установленной скоростью (18-20 °C/с) в зависимости от скорости перемещения витков в линии «Стелмор», количества и мощности включения вентиляторов и диаметра готового профиля.

Выполнены измерения температур витков бунтового проката на первом вентиляторе при разных режимах его работы и определена математическая зависимость изменения температуры катанки в зависимости от интенсивности подачи воздуха.

Разработаны методики управления водяным охлаждением на пяти секциях водяного охлаждения (3+2 секции) и воздушным охлаждением БСО на рольганге Стелмора в линии катанки стана 370/150. Для диаметров 5,5–18,5 мм охлаждение с установленной скоростью обеспечивается расчетным количеством задействованных вентиляторов от 3-х до 10-ти и мощностью включения от 25 до 90%.

По результатам измерений и обработки полученных данных методом наименьших квадратов получены 3 линейные зависимости – множественные регрессии по расходу воды и температуры охлаждения бунтового проката на свободном воздухе:

$$- W = 75,309 \cdot d - 178,57;$$

$$- T_{\text{центр}} = 1227,8 - 55,14 \cdot d - 34,2 \cdot n - 172,31 \cdot V_T - 3,92 \cdot P;$$

$$- T_{\text{края}} = 1121,06 - 40,54 \cdot d - 31,54 \cdot n - 215,9 \cdot V_T - 2,22 \cdot P,$$

где  $W$  – расход воды, м<sup>3</sup>/ч;  $d$  – диаметр проката, мм;  $n$  – количество вентиляторов;  $V_T$  – скорость транспортировки витков, м/с;  $P$  – мощность вентиляторов, %.

Уравнения регрессии характеризуются следующими статистическими характеристиками:

- Для водяного охлаждения объем расчетной выборки  $N = 80$ , критерий Фишера  $F_{(\text{табл})} = 5,987$  и  $F_{(\text{расч})} = 990,05$ , коэффициенты Стьюдента  $t_{(\text{табл})} = 2,447$  и  $|t_{(\text{расч})}| = 31,47$ , множественной корреляции  $R = 0,997$ , коэффициент детерминации стандартная  $R^2 = 0,994$ ,  $R_{(\text{табл})} = 0,22$ , ошибка оценки зависимой переменной по уравнению составила 2,5%, что меньше 5%, это свидетельствует о том, что уравнение статистически значимо.

- Для воздушного охлаждения раската на линии «Стелмор»:

- для центра витка объем расчетной выборки  $N = 2251$ , критерий Фишера  $F_{(\text{табл})} = 2,38$  и  $F_{(\text{расч})} = 4344,8$ ; коэффициенты Стьюдента  $t_{(\text{табл})} = 1,96$  и  $|t_{(\text{расч})}| = 110,34; 56,10; 76,41; 34,37; 67,25$  (для параметров - свободный член  $d, n, V_T, P$ ), множественной корреляции  $R = 0,94$ ; коэффициент детерминации стандартная  $R^2 = 0,89$ ;  $R_{(\text{табл})} = 0,041$ .

- для края витка объем расчетной выборки  $N = 2351$ , критерий Фишера  $F_{(\text{табл})} = 2,38$  и  $F_{(\text{расч})} = 2871,1$ ; коэффициенты Стьюдента  $t_{(\text{табл})} = 1,96$  и  $|t_{(\text{расч})}| = 91,41; 37,64; 65,41; 38,28; 34,27$  (для параметров Свободный член  $d, n, V_T, P$ ), множественной корреляции  $R = 0,91$ ; коэффициент детерминации стандартная  $R^2 = 0,83$ ;  $R_{(\text{табл})} = 0,040$ .

Определена требуемая интенсивность охлаждения для бунтового проката диаметром от 5,5 до 18,5 мм с учетом условий [1] и результатов эксперимента.

3. Сфероидизирующий отжиг на структуру зернистого перлита [13].

Для того чтобы сформировать структуру исходного аустенита, необходимо четко регулировать важнейшие параметры стадии сфероидизирующего отжига. Продолжительность выдержки при температуре отжига выбирается с таким расчетом, чтобы обеспечить необходимую полноту превращения перлита в аустенит, а также максимально выровнять температуры во всем объеме металла. Если форма выделения карбидов, зависящая от состояния аустенита, определяется температурой отжига металла, то величина выделившихся карбидов, дисперсность карбидной фазы, определяется скоростью охлаждения. В проведенных исследованиях по четырем режимам показано, что изменение температуры и скорость охлаждения во всех режимах одинаковы. Итак, установлены зависимости:

- 1-й режим – 10% сокращения времени СО – достигнута необходимая коалесценция дисперсных частиц;
- 2-й режим – 25% сокращения времени СО – сформированы сфероидальные частицы по границам зерен;
- 3-й режим – 50% сокращения времени СО – установлено равновесное – однородное распределение карбидов;
- 4-й режим – 75% сокращения времени СО – степень сфероидизации не достигнута.

Определена ключевая роль циклического сфероидизирующего отжига с уточненным временем выдержки в области подкритических температур (620–780°C). Установлено, что данный процесс не является простым суммированием идентичных операций. Напротив, каждый последующий термоцикл вносит качественные изменения в микроструктуру, что обуславливает необходимость тщательного подбора количества циклов и длительности выдержек. Установлена прямая зависимость кинетики коалесценции карбидной фазы от длительности выдержки при маятниковом отжиге: с уменьшением времени по режимам от №1 к №3 наблюдается рост среднего размера глобулярных карбидов. Росту дисперсности карбидных частиц сопутствует снижение их объемной доли и увеличение среднего межкарбидного расстояния в структуре сфероидизированного перлита. Режим №1, обеспечивающий минимальный размер карбидов (0,484–0,560 мкм) и их максимальную плотность распределения, формирует наиболее однородную и дисперсную структуру. Режим №2 фиксирует процесс коалесценции: карбиды укрупняются, их объемная доля снижается, а расстояние между ними увеличивается по сравнению с Режимом №1. Это демонстрирует эволюцию структуры от дисперсной к равновесной сфероидальной. Микроструктура, полученная по режиму №3, характеризуется укрупненными сфероидальными карбидами, соответствующими регламентированным требованиям ГОСТ 801. Таким образом, варьируя параметры циклического отжига, можно целенаправленно управлять дисперсностью и морфоло-

гией карбидной фазы для получения заданных свойств в стали. Режим №4 демонстрирует неполную сфероидизацию (сохранение участков пластинчатого перлита), что подтверждает необходимость определенного минимального времени для протекания диффузионных процессов.

Получение мелкодисперсного пластинчатого перлита в исходной микроструктуре бунтового проката из стали ШХ15 обеспечивает существенное (до 50%) снижение времени циклического сфероидизирующего отжига.

При недостаточном времени выдержек (4-й режим) сфероидизация пластин карбидов железа не происходит, однако их дробление также не обнаружено. Это свидетельствует о том, что сфероидизация мелкодисперсного перлита происходит в одну стадию – непосредственно при трансформации пластин в глобули – режим неудовлетворительный.

### Заключение

1. Результаты исследований по влиянию ГО НЛЗ из стали ШХ15 в исходную микроструктуру бунтового проката до и после СО показали, что при прокатке НЛЗ с ГО и без ГО качественные показатели проката, произведенного на линии «Стелмор», практически идентичны. Структура катанки с ГО НЛЗ после прокатки имеет гарантированное отсутствие осевой ликвации. После СО происходит полная глобулизация пластинчатого перлита.

2. В ходе проведения исследований по разработке режима двухстадийного охлаждения бунтового проката из стали ШХ15 в условиях стана 370/150 разработаны методики управления водяным охлаждением на пяти секциях водяного охлаждения (3+2 секции) и воздушным охлаждением БСО на рольганге Стелмора в линии катанки стана 370/150. Определены главные критерии получения мелкодисперсного перлита, заключающиеся в том, что раскат на первой стадии с помощью воды охлаждают до температуры  $t_k = 870 \pm 20^\circ\text{C}$  и на второй стадии последующее воздушное охлаждение с установленной скоростью (18–20 °C/c) в зависимости от скорости перемещения витков (преимущественно 1 м/с) в линии «Стелмор», количества и мощности включения вентиляторов и диаметра готового профиля. Методом наименьших квадратов получены две линейные зависимости – множественные регрессии по водяному охлаждению и охлаждению раската на свободном воздухе, а также определена математическая зависимость изменения температуры катанки в зависимости от интенсивности подачи воздуха. Так, для  $\varnothing 5,5$  мм до  $\varnothing 18,5$  мм расчетное количество задействованных вентиляторов от 3-х до 10-ти и мощностью включения от 25 до 90 %.

3. Установлены допустимые критерии СО для получения глобулярного цементита с исходной микроструктурой мелкодисперсного перлита в бунтовом прокате из стали ШХ15, что обеспечило существенное (до 50%) снижение времени циклического СО. На

основании проведенных исследований по изучению и определению эффективной структуры установлено, что исходная грубопластинчатая форма выделения цементита на поверхности бунтового проката после горячей прокатки приводит к завышенным показателям глубины ОБС (не сфероидизированные пластины цементита) после СО бунтов катанки. Разработанный режим СО бунтового проката «маятникового» типа с двумя циклами повторения «нагрев-охлаждение» в температурном диапазоне 727+/-5 и 620+/-5°C с общим временем ТО 910–1980 мин позволил получить требуемые по ГОСТ 801 качественные параметры зернистого перлита.

4. Показано, что при горячей деформации степень ликвации уменьшается за счет многократных высокотемпературных нагревов и действия самой деформации, то есть проявляется эффект многоциклической ТМО, в результате улучшается однородность структуры, снижается балл карбидной неоднородности и размер карбидов, достигается равномерное распределение и округлая форма частиц карбидной и интерметаллидной фаз.

#### Список источников

1. Стали для изготовления подшипников качения специального назначения (обзор) / Е. Н. Коробова [и др.] // Труды ВИАМ. 2021. № 11 (105). С. 3–11.
2. Борисов В.Н., Почукаева О.В., Почукаев К.Г. Отечественная инвестиционная техника на мировом рынке: динамика и структурные сдвиги. // Проблемы прогнозирования. 2020. № 5 (182). С. 3–13.
3. Капп Т.О. Роль производства подшипников в российской экономике // Научные труды Вольного экономического общества России. 2010. Т. 137. С. 240–245.
4. Мордасов Д.М., Фатеев Ю.Г., Зотов С.В. Исследование причин преждевременного разрушения подшипников буксового узла // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2015. Т. 21, № 4. С. 686–695.
5. Черменский О.Н., Федотов Н.Н. Подшипники качения: справочник-каталог. М.: Машиностроение, 2003. 576 с.
6. Становление и развитие ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» или Белорусскому металлургическому заводу – 40 лет: современный взгляд в прошлое, настоящее и будущее / С.А. Мозгов, Н.И. Анелькин, А.В. Манцевич, Д.Г. Войтеховский // Литье и металлургия. 2024. № 4. С. 33–46.
7. Влияние факторов нагрева на формирование карбидной сетки в стали ШХ15СГ / А. Б. Стеблов, В. И. Тимошпольский, Д. В. Ленартович [и др.] // Литье и металлургия. 2005. № 2 (34). С. 65–73.
8. Влияние гомогенизирующего отжига непрерывнолитых заготовок на структуру и механические свойства металла бунтового проката из подшипниковой стали / С.А. Савченко, И.А. Ковалева, И.В. Астапенко, А.Б. Сычков // Сталь. 2025. № 8. С. 45–50.
9. Особенности формирования мелкодисперстной структуры бунтового проката подшипниковой стали / С.А. Савченко, И.А. Ковалева, И.В. Астапенко, А.Б. Сычков // Черные металлы. 2024. № 4. С. 65–73.
10. Формирование микроструктуры и механических свойств арматурного проката в бунтах из двух- и мультифазной стали / А.Б. Сычков, А.М. Нестеренко, А.Н. Завалишин, А.Б. Моллер [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21, № 4. С. 70–80.
11. Xu X.J., Kong J.Q. Study on Cooling Process of Hot Rolled Wire Rod with Dual Phase Microstructure // Advanced Materials Research. 2012, vols. 415-417, pp. 779-783.
12. Xiurong, Zuo, Zhengyue Zhou. Study of Pipeline Steels with Acicular Ferrite Microstructure and Ferrite-bainite Dual-phase Microstructure // Materials Research, 2015, vol. 18, no. 1, pp. 36-41
13. Влияние исходной структуры бунтового проката из подшипниковой марки стали на равномерность получения структуры после сфероидизирующего отжига / С.А. Савченко, И.А. Ковалева, И.А. Гузова, А.Б. Сычков // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2023. Т. 79, № 3. С. 251–260.

#### Сведения об авторах

**Сычков Александр Борисович** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры литейных процессов и материаловедения Института металлургии, машиностроения и обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: absyckov@mail.ru

**Савченко Сергей Александрович** – соискатель ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 – Металлургия и термическая обработка металлов и сплавов Института металлургии, машиностроения и обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

**Тулупов Олег Николаевич** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры обработки материалов давлением имени М.И. Бояршинова Института металлургии, машиностроения и обработки матери-

алов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

**Моллер Александр Борисович** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры обработки материалов давлением им. Г.И. Бояршинова Института металлургии, машиностроения и обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

---

*INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH*

---

**ENSURING QUALITY INDICATORS OF STRUCTURE FORMATION  
ON THE STELMOR LINE IN BEARING ROLLED PRODUCTS MADE OF IX15 STEEL**

**Sychkov Alexander B.** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Foundry Processes and Materials Science of the Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Materials Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: absychkov@mail.ru;

**Savchenko Sergey A.** – candidate for the degree of candidate of technical sciences in specialty 2.6.1 - Metallurgy and heat treatment of metals and alloys at the Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Materials Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Tulupov Oleg N.** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Materials Pressure Processing named after M.I. Boyarshinov of the Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Materials Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Moller Alexander B.** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Boyarshinov Department of Materials Pressure Processing of the Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Materials Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Abstract** The relevance of this work lies in the high scientific and practical significance of developing a technology for producing bearing grade IX15 steel and improving its structure formation on a modern 370/150 small-section wire rod mill using continuously cast billets (CCB) with a cross-section of 250×300 mm, featuring a high rolling speed of 100 m/s or more, a 10-stand wire rod unit, and a 4-stand reduction and calibration unit, which significantly influence the structure formation of the rolled product. The aim of this work is to study and form a homogeneous microstructure and properties of rolled steel by developing modes of preliminary heat treatment (PHT - homogenizing annealing (HA) of the cast structure of CCB) and final heat treatment (FHT) - sorbitization of lamellar pearlite and its spheroidization - SO), ensuring maximum technological efficiency of processing rolled steel at consumers. Quality characteristics were analyzed using the following parameters: macrostructure (CCB) with a cross-section of 250×300 mm on macrotemplates, microstructure and mechanical properties of rolled products with a diameter of 5.5–18.5 mm – in accordance with methodological standards. For the first time, it has been established that the level of carbide segregation is achieved through a significant degree of drawing and partial homogenization of the macrostructure of the casting and rolled products during processing on the 370/150 mill line. Casting products for the production of coiled products with a diameter greater than 8.5 mm must undergo preliminary heat treatment (HT) (temperature - 1200°C for at least 6 hours). An efficient two-stage cooling system for IX15 steel coils was developed and implemented on a Stelmor line (coiling temperature: 860-870°C, air cooling rate: 18-20°C/s). This process yields at least 95% sorbitol-like pearlite with an interlamellar distance of 0.07-0.14 μm, a cementite plate thickness of no more than 0.08 μm, and minor (less than 5%) areas of thin-lamellar and medium-lamellar pearlite, without tempering. The research results made it possible to achieve the objective set forth in this article.

**Keywords:** microstructure, Stelmor two-stage cooling lines, rolled products, bearing steel, continuously cast billets, set of quality indicators, sorbitol, granular pearlite, light microscope, energy-dispersive microanalyzer.

---

Ссылка на статью:

Обеспечение показателей качества структурообразования на линии «Стелмор» в подшипниковом бунтовом прокате из стали IX15 / Сычков А.Б., Савченко С.А., Тулупов О.Н., Моллер А.Б. // Теория и технология металлургического производства. 2025. №4(55). С. 24-31.

Sychkov A.B., Savchenko S.A., Tulupov O.N., Moller A.B. Ensuring quality indicators of structure formation on the Stelmor line in bearing rolled products made of IX15 steel. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2025, vol. 55, no. 4, pp. 24-31.